

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05538

研究課題名（和文）宇宙ニュートリノによる標準模型を超えた物理の探索

研究課題名（英文）Search for the signals beyond the standard model with cosmic neutrinos

研究代表者

石原 安野（Ishihara, Aya）

千葉大学・ハドロン宇宙国際研究センター・教授

研究者番号：40568929

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 135,500,000円

研究成果の概要（和文）：南極点ニュートリノ望遠鏡IceCube及びSuper-Kamiokande実験による標準理論を超える物理信号探査の感度向上にむけ系統誤差の削減を進め、物理解析を改善した。共通の系統誤差である大気ニュートリノ流量計算の高度化・精密化として、最新加速器データ及び宇宙線実験データを取入れ、大気ニュートリノ計算コードを拡張、異なるエネルギー領域における統一モデルの確立を進め系統誤差の削減に成功。氷河中光伝搬起因の系統誤差削減に向け、次世代南極点ニュートリノ望遠鏡IceCube-Gen2のPhase-1計画（IceCube-Upgrade）に用いられる新型光検出器D-Egg100台の製作と較正を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

異なるエネルギー領域で世界最先端の成果を生み出している南極点ニュートリノ望遠鏡IceCubeおよびSuper-Kamiokande実験において高エネルギー宇宙ニュートリノをプローブとした新物理探索を進めた。標準理論を超える物理信号の探査感度を向上させることで、それまで見ることが難しかった現象を見ること、見えない場合は世界最高感度での制限を付けることに成功した。さらに、IceCube-Gen2のPhase-1計画において、新型光検出器D-Eggの製作と較正を実施し、氷河中の光伝搬に起因する系統誤差の削減に大きな寄与をした。

研究成果の概要（英文）：We have improved the physics analysis and reduced systematic errors to enhance the sensitivity of the search for signals beyond the Standard Model using the South Pole Neutrino Telescope IceCube and the Super-Kamiokande experiment. By incorporating the latest accelerator data and cosmic ray experiment data, we advanced and refined the atmospheric neutrino flux calculations, expanded the atmospheric neutrino calculation code, and established a unified model across different energy regions, successfully reducing systematic errors. To reduce systematic errors caused by light propagation in glaciers, we manufactured and calibrated 100 units of the new D-Egg photodetectors used in the next-generation South Pole Neutrino Telescope IceCube-Gen2 Phase-1 project (IceCube-Upgrade).

研究分野：ニュートリノ宇宙物理学

キーワード：ニュートリノ検出器 大気ニュートリノモデル 標準モデルを超える物理

1. 研究開始当初の背景

宇宙ニュートリノは二つの検出器から 10^6 eV から 10^{16} eV という実に 10 桁にもわたるエネルギー領域のニュートリノ観測を可能とする。このような幅広いエネルギー領域を統一的に、系統誤差を含めて理解する機会は限られている。一方、宇宙における粒子生成は宇宙初期から存在していると考えられているダークマターやモノポールなど、根源的な謎が多い。これらの謎に大局的に切り込むには、宇宙ニュートリノを用いて人工的に作ることが難しいエネルギー領域までの物理モデルまでを網羅的に精査し新たな発見を目指すこと、そして、幅広いエネルギー領域における統一的な系統誤差の理解を進めることからその信頼性を向上させることが重要である。しかし、これまでは、異なる実験やエネルギーの違いが統一的理解に対する障壁になってきた。

2. 研究の目的

IceCube 実験で確立した観測の技術を元に、高エネルギー宇宙ニュートリノをプローブとした新物理探索を進めるとともに、A01 班との連携により幅広いエネルギーでのニュートリノ天文学を展開する。そのためには南極氷河中で 2011 年から稼働中で世界で唯一 TeV から 10PeV という高エネルギー領域のニュートリノに感度を持つ IceCube 実験と、より低いエネルギーのニュートリノに感度のあるスーパーカミオカンデを連携させ、MeV から PeV を超える幅広いエネルギー領域で新物理探索の高精度化を進めることを目的とする。

宇宙線ハドロン相互作用とニュートリノフラックス計算の高度化・精密化を MeV 領域から PeV 領域の広い範囲で包括的に行うことで、幅広いエネルギー領域における系統誤差の削減を達成し、ニュートリノによる標準模型を超える物理の探索を行う。高エネルギーニュートリノ領域では次世代検出器 IceCube-Gen2 実験の Phase 1 計画を推し進める。本研究では既存の IceCube 検出器の中心に高感度校正システムを含む 100 台の光検出器モジュールの配列を建設し、IceCube 実験の系統誤差の削減を行う。

3. 研究の方法

IceCube 実験の高エネルギー拡張検出器 IceCube-Gen2 の Phase 1 計画として、既存 IceCube 検出器の中心に高感度校正システムを含む光検出器の Phase 1 アレイを完成させる。この Gen2 Phase 1 による校正情報の取得により、IceCube データを過去にさかのぼって、標準理論の枠内に収まらない現象の高精度解析を行う。

現状の IceCube 解析で最も大きい系統誤差は、50cm スケールの近傍氷の散乱特性、100m スケールの中長距離散乱特性の方向依存性、及び光検出器の実効光検出率である。本計画では 100 台の校正した新型光検出器(D-Egg)を制作し、校正ユニットと共に南極点に埋設し南極深氷河、及び検出器埋設の際に再凍結した氷(再凍結氷)の散乱吸収パラメータを測定する。それまでに取得された約 10 年分の IceCube データ解析に新たに測定された詳細な氷パラメータを取り入れることで、高エネルギーニュートリノ事象の再構築エネルギー・角度分解能、フレーバー同定能力の向上を達成し、世界最高感度での宇宙ニュートリノ観測・標準理論を超える信号の探査を行い、標準理論を超える宇宙現象の発見、そうでなければ最も厳しい上限を課す。

宇宙ニュートリノの精密観測に向けては、大気ニュートリノの理解が欠かせない。そこで、もう一つの柱として大気ニュートリノ流量の精密モデルの構築を据える。大気ニュートリノは MeV から PeV 領域まで分布し、高エネルギー宇宙ニュートリノ探査においては、宇宙線が大気で反応して生成する大気ニュートリノが観測の障壁となってきた。近年取得されている最新の宇宙線観測及び加速器測定(LHCf)結果、本研究領域 B02 班が推進する DsTau 実験や EMPHATIC 実験からの最新成果、さらに、これまでに改良されてきた高エネルギーハドロン反応モデルを結集し、幅広いエネルギー領域にわたる世界最高レベルのニュートリノ生成モデルを構築し、SK から IceCube まで広く大気ニュートリノによる系統誤差の減少を目指す。

4. 研究成果

概要: 南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube 及び Super-Kamiokande 実験による標準理論を超える物理信号探査の感度向上を目指した系統誤差の削減を進めた。南極氷河中光伝搬起因の系統誤差削減に向け、次世代南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube-Gen2 の Phase-1 計画(IceCube-Upgrade)に用いられる新型光検出器 D-Egg100 台の製作、その実験室での校正を進めるとともに D-Egg にインストールされている LED 光源からの光の南極氷河伝搬シミュレーションを行い、系統誤差削減性能をみつかった。D-Egg については、プロトタイプ機の開発の進展及びその性能が評価され、2019 年までに世界 12 か国から成る国際共同実験で正式にその採用が決定、最終審査

に合格した。さらに、共通の系統誤差である大気ニュートリノ流量計算の高度化・精密化として、最新加速器データ及び宇宙線実験データを取入れ、大気ニュートリノ計算コードを拡張、異なるエネルギー領域における統一モデルの確立を進め、系統誤差の削減に成功した。

下に特に特筆すべき成果について記す。

(1)物理解析

本研究計画の枠組みでニュートリノ速報システムの上昇、超高エネルギーニュートリノ探査、事象再構築精度の向上、南極点氷河系統誤差削減を目指した研究を進め、超高エネルギーニュートリノ探査は、12.6年のデータを用い改良を加えた解析を行うことで、世界最高の上限值を達成、国際学会で発表を行った。IceCube 実験では、申請時は約3の有意度であった型セIFAート銀河 NGC1068 と宇宙ニュートリノ到来方向の角度相関を、再解析により4.2の有意度に更新、また、それまでは難しかった10TeV以下のエネルギーの粒子シャワー事象の事象再構築を深層学習により可能とし、そこから銀河面からのニュートリノ信号を4.5の有意度で得ることに成功した。IceCube データを用いた解析及びその系統誤差の理解を進め、量子重力のニュートリノフレーバーに与える影響、 $v/c > 0.8$ のモノポールに対する世界最高感度での探査の結果を出版した。また、加速器では難しい標準理論の検証となる6PeVのグラシウ共鳴事象の観測にも成功した。スーパーカミオカンデ実験での暗黒物質間接探索として、銀河中心方向からの暗黒物質対消滅ニュートリノの探索し、10GeV/c²以下の領域では最もよい対消滅断面積への制限を得た。

- ・ “Search for Quantum Gravity Using Astrophysical Neutrino Flavour with IceCube”, A. Ishihara, K. Farrag, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, A. Pollmann, M. Meier, S. Yoshida 他 IceCube Collaborations, Nature Physics 18 (2022) 1287-1292.
- ・ “Search for Relativistic Magnetic Monopoles with Eight Years of IceCube Data”, A. Ishihara, A. Pollmann, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, K. Farrag, M. Meier, S. Yoshida 他 IceCube Collaborations, Phys Rev Lett (2022), 128:051101.
- ・ “Detection of a Particle Shower at the Glashow Resonance with IceCube”, A. Ishihara, L. Lu, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, K. Farrag, A. Pollmann, M. Meier, S. Yoshida 他 IceCube Collaborations, Nature 591 (2021) 220-224.

(2)D-Eggの製造

当研究計画により100台のD-Eggの製造を行ったうえで、D-Eggに対しては長期間(約20日)全数低温試験を行い問題のあるモジュールははじいた上で、そこから詳細な較正パラメータの抽出をおこなった。得られた較正パラメータのデータベース化を行いその後の解析やシミュレーションの高精度化に用いる。D-Eggは2024年夏に南極点に向けて輸送予定である。最終試験から得られたデータを用いたD-Eggの性能を示す論文を出版した。掘削孔に最適化した細長い形状でありながら70MPa耐圧性能を有し、その多くを日本企業製の部品で製造するデザインの有用性を示したもので、IceCube-Gen2実験を進めるうえでも重要な結果である。

- ・ “D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube”, A. Ishihara, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, K. Kin, M. Meier, S. Yoshida, A. Pollmann 他 IceCube Collaborations, JINST 18 (2023) P04014.

(3)大気ニュートリノモデル

大気ニュートリノ流量計算の高度化・精密化では、最新加速器データ及び宇宙線実験データの取入れを行った。大気ニュートリノ生成モデルのスタンダードとなっている本田モデルコードを今後の拡張を見据えての拡張やその改修を進め、また、RHIC や LHC からの高エネルギー宇宙線ハドロン相互作用データや気球実験による高空での大気ミュオン測定データについての検討を行い、最新の加速器ハドロン生成データの導入を行うことで、大気ニュートリノモデルのGeV領域における高精度化を確立した。その後、PeV領域への拡張を進め、広いエネルギー領域における統一モデルの確立へと進めた。広いエネルギー領域での標準模型を超える物理探査にむけては、新大気ニュートリノ計算プログラムの検証研究を通し、各実験の系統誤差の相互理解を進め、これらの系統誤差が異なるエネルギー領域での解析においてどのように影響を与えるかを精査した。

宇宙線ハドロン相互作用とニュートリノフラックスの計算の精密化で異なる加速器実験の生成断面積をパラメータ化し取り入れ、その結果得られた大気ニュートリノモデルと既存のモデ

ルとの比較を学会で発表した。10GeV を超えるエネルギー領域の不定性要因である K 粒子生成理解に向け、超前方ストレージネス測定準備として新たなトリガーシステムや DAQ システムを開発、高統計データの取得に成功している。

- “Measurement of energy flow, cross section and average inelasticity of forward neutrons produced in $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions with the LHCf Arm2 detector.”, Y. Itow, H. Menjo, K. Sato 他 LHCf Collaboration, JHEP 2020, (2020) 016.
- “Transverse Single-Spin Asymmetry for Very Forward Neutral Pion Production in Polarized p+p Collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV”, Y. Itow, H. Menjo, K. Sato 他 RHICf Collaboration, Phys. Rev. Lett. 124, 252501 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計33件（うち査読付論文 29件 / うち国際共著 27件 / うちオープンアクセス 28件）

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 18
2. 論文標題 Search for quantum gravity using astrophysical neutrino flavour with IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1287 ~ 1292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01762-1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 18
2. 論文標題 D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P04014 ~ P04014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/18/04/P04014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 380
2. 論文標題 Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1338 ~ 1343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.adc9818	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 930
2. 論文標題 Search for High-Energy Neutrino Emission from Galactic X-ray Binaries with IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac67d8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 17
2. 論文標題 Framework and Tools for the Simulation and Analysis of the Radio Emission from Air Showers at IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P06026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/06/P06026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 129
2. 論文標題 Strong Constraints on Neutrino Nonstandard Interactions from TeV-scale ν_μ Disappearance at IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 11804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.011804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 106
2. 論文標題 Search for neutrino emission from cores of active galactic nuclei	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D106 (2022)	6. 最初と最後の頁 22005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.022005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 106
2. 論文標題 Density of GeV Muons in Air Showers Measured with IceTop	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 32010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.032010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 82
2. 論文標題 Low energy event reconstruction in IceCube DeepCore	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-022-10721-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shigeru Yoshida, Kohta Murase, Masaomi Tanaka, Nobuhiro Shimizu, Aya Ishihara	4. 巻 937
2. 論文標題 Identifying High-energy Neutrino Transients by Neutrino Multiplet-triggered Follow-ups	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac8dfd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 129
2. 論文標題 Search for Unstable Sterile Neutrinos with the IceCube Neutrino Observatory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 151801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.151801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 938
2. 論文標題 Search for Astrophysical Neutrinos from 1FLE Blazars with IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac8de4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 938
2. 論文標題 Searching for High-energy Neutrino Emission from Galaxy Clusters with IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac966b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 18
2. 論文標題 Search for Quantum Gravity Using Astrophysical Neutrino Flavour with IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01762-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 378
2. 論文標題 Evidence for Neutrino Emission from the Nearby Active Galaxy NGC 1068	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abg3395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 17
2. 論文標題 Graph Neural Networks for Low-Energy Event Classification & Reconstruction in IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P11003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/11/P11003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 939
2. 論文標題 Searches for Neutrinos from Gamma-Ray Bursts Using the IceCube Neutrino Observatory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9785	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 82
2. 論文標題 Detection of Astrophysical Tau Neutrino Candidates in IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-022-10795-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 946
2. 論文標題 Limits on Neutrino Emission from GRB 221009A from MeV to PeV Using the IceCube Neutrino Observatory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-022-10795-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 945
2. 論文標題 Searches for Neutrinos from Large High Altitude Air Shower Observatory Ultra-highenergy γ -Ray Sources Using the IceCube Neutrino Observatory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acb933	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 944
2. 論文標題 IceCube Search for Neutrinos Coincident with Gravitational Wave Events from LIGO/ Virgo Run03	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca5fc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Abbasi et al (The IceCube Collaboration)	4. 巻 930
2. 論文標題 Search for High-Energy Neutrino Emission from Galactic X-ray Binaries with IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac67d8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: C. Hill, A. Ishihara, K. Kin, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, S. Yoshida, et al.	4. 巻 591
2. 論文標題 Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 220 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-03256-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: C. Hill, A. Ishihara, K. Kin, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, S. Yoshida, et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 Follow-up of Astrophysical Transients in Real Time with the IceCube Neutrino Observatory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: C. Hill, A. Ishihara, K. Kin, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, S. Yoshida, et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 Measurements of the time-dependent cosmic-ray Sun shadow with seven years of IceCube data: Comparison with the Solar cycle and magnetic field models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.042005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Abe et al. (The Super-Kamiokande Collaboration)	4. 巻 102
2. 論文標題 Indirect search for dark matter from the Galactic Center and halo with the Super-Kamiokande detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.072002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 C. Hill, A. Ishihara, K. Kin, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, S. Yoshida 他 IceCube Collaboration	4. 巻 2019
2. 論文標題 Efficient propagation of systematic uncertainties from calibration to analysis with the SnowStorm method in IceCube.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 048 ~ 048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/10/048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 C. Hill, A. Ishihara, K. Kin, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, S. Yoshida 他 IceCube Collaboration	4. 巻 101
2. 論文標題 Combined Sensitivity to the Neutrino Mass Ordering with JUNO, the IceCube Upgrade, and PINGU.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 32006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.032006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Sato, Y. Itow, H. Menjo and M. Honda	4. 巻 1468(TAUP2019)
2. 論文標題 Update of the atmospheric neutrino flux simulation ATMNC for next-generation neutrino experiment.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J.Phys. Conf Ser.	6. 最初と最後の頁 12194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Nagai	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of the front-end electronics for the new optical module "D-Egg" for IceCube-Gen2.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Ishihara	4. 巻 1468(TAUP2019)
2. 論文標題 D-Egg: new optical sensors for the IceCube Upgrade and Gen2.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 12166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase, S. Yoshida, L. Lu, Y. Makino 他 IceCube Collaboration	4. 巻 98
2. 論文標題 Differential Limit on the Extremely-High-Energy Cosmic Neutrino Flux in the Presence of Astrophysical Background from Nine Years of IceCube Data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 62003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.062003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Itow, Y. Makino, H. Menjo 他 LHCf Collaborations	4. 巻 2018
2. 論文標題 Measurement of inclusive forward neutron production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the LHCf Arm2 detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2018)073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計36件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 Neutrino Telescopes
3. 学会等名 PPC2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 Review of neutrino oscillation study using high energy atmospheric neutrinos
3. 学会等名 Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 C. Hill
2. 発表標題 D-Egg: A dual PMT Optical Module for the IceCube Upgrade
3. 学会等名 ICRC2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Pollmann
2. 発表標題 Physics beyond the Standard Model Searches with IceCube
3. 学会等名 Recontre de Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Menjo
2. 発表標題 Very forward strange hadron measurement at LHC
3. 学会等名 3rd Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range (WANP2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo
2. 発表標題 Very forward particle measurements with LHCf and RHICf
3. 学会等名 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Sato
2. 発表標題 Recent status of Super-K and Hyper-K
3. 学会等名 The 5th KMI International Symposium (KMI2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K.Sato
2. 発表標題 Update of Honda atmospheric neutrino flux calculation with implementing recent hadron interaction measurement
3. 学会等名 37th international Cosmic Ray Conference (ICRC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C.Hill
2. 発表標題 IceCube Upgrade & the Performance of the D-Egg Optical Modules
3. 学会等名 TeV Particle Astrophysics 2021(TeVPA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Ishihara, N. Shimizu
2. 発表標題 A next-generation optical sensor for IceCube-Gen2
3. 学会等名 37th international Cosmic Ray Conference (ICRC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y.Itow
2. 発表標題 LHCf experiment:Current status and future prospect
3. 学会等名 Low-x 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 Photo-sensors for the South Pole Neutrino Observatory: IceCube and IceCube-Gen2
3. 学会等名 the IEEE Nuclear Science Symposium on "Advanced technologies for future large-scale neutrino experiments" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原 安野
2. 発表標題 Recent updates on real-time alert system with IceCube
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原 安野
2. 発表標題 新型光検出器D-Eggの南極点氷河埋設に向けた耐性評価
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武政 祐哉
2. 発表標題 新型光検出器D-Egg内校正用LEDの光度・角度分布測定におけるシステム開発と測定結果
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 万里子
2. 発表標題 IceCube Gen2計画に向けた次世代光検出器「mEgg」の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Stephany Vargas
2. 発表標題 Droop correction database for D-Egg modules
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森井 保次
2. 発表標題 IceCube実験アップグレードに用いる新型光検出器D-EggのDAQ基板の単体評価
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原 安野
2. 発表標題 Recent progresses on the high energy neutrino astrophysics
3. 学会等名 第33回 理論懇シンポジウム 「理論天文学・宇宙物理学のブレイクスルー」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金 賢一
2. 発表標題 IceCube-Upgradeに向けた新型光検出器D-Eggの製造及び南極への発送に向けた最終試験
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次春季大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森井 保次
2. 発表標題 IceCube実験アップグレードの新型光検出器D-Eggに用いられるPMTとDAQ基板の大光量信号時の応答性評価
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次春季大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武政 祐哉
2. 発表標題 IceCube-Upgrade実験のための較正用LEDシステムの光度・角度分布の測定と南極氷河較正に向けたシミュレーションの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次春季大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Neutrino Astrophysics: Experimental
3. 学会等名 AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Sato, Y.Itow, H.Menjo, M.Honda
2. 発表標題 More precise neutrino flux calculation
3. 学会等名 1st Workshop for Interplay of Neutrino and Dark matter Experiments and Exotics Searches (INDEES 2021) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤和史, 伊藤好孝, 毛受弘彰, 本田守広
2. 発表標題 加速器実験データを用いた大気ニュートリノHONDAフラックス計算の高度化
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤和史, 伊藤好孝, 毛受弘彰, 本田守広
2. 発表標題 加速器実験データを用いた大気ニュートリノHONDAフラックス計算の高度化
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Sato, Y.Itow, H.Menjo, M.Honda
2. 発表標題 Upgrade of Honda atmospheric neutrino flux calculation with implementing recent hadron interaction measurements
3. 学会等名 XXIX International Conference on Neutrino Physics (Neutrino2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Sato, Y. Itow, H. Menjo and M. Honda
2 . 発表標題 Update of the atmospheric neutrino flux simulation ATMNC for next-generation neutrino experiment
3 . 学会等名 16th TAUP2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Ishihara for the IceCube Collaboration
2 . 発表標題 The IceCube Upgrade -- Design and Science Goals
3 . 学会等名 36th ICRC2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H.Menjo for the LHCf collaboration
2 . 発表標題 The results and future prospects of the LHCf experiment.
3 . 学会等名 36th ICRC2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Ishihara for the IceCube Collaboration
2 . 発表標題 D-Egg: new optical sensors for the IceCube Upgrade and Gen2.
3 . 学会等名 16th TAUP2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Nagai for the IceCube Collaboration
2. 発表標題 Electronics Development for the New Photo-Detectors (PDOM and D-Egg) for IceCube-Upgrade
3. 学会等名 36th ICRC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 Recent results on astrophysics and particle physics from IceCube
3. 学会等名 XLVIII International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Menjo
2. 発表標題 Ultra High Energy Cosmic Rays 2018
3. 学会等名 UHECR2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Itow
2. 発表標題 Initial results from RHICf
3. 学会等名 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Ishihara
2. 発表標題 アイスクューブ・ジェンツ (IceCube-Gen2)で見る宇宙ニュートリノ
3. 学会等名 春季物理学会 シンポジウム 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

千葉大学 ハドロン宇宙国際研究センター 研究成果 http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/result2023.html http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/result2022.html http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/result2021.html http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/result2020.html http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/result2019.html http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/result2018.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	永井 遼 (Nagai Ryo) (00801672)	千葉大学・大学院理学研究院・特任助教 (12501)	
研究分担者	伊藤 好孝 (Yoshitaka Itoh) (50272521)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授 (13901)	
研究分担者	清水 信宏 (Shimizu Nobuhiro) (60869395)	千葉大学・大学院理学研究院・助教 (12501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 和史 (Sato Kazufumi) (10769673)	東京大学・宇宙線研究所・特任助教 (12601)	
研究分担者	間瀬 圭一 (Mase Keiichi) (80400810)	千葉大学・大学院理学研究院・助教 (12501)	
研究分担者	吉田 滋 (Yoshida Shigeru) (00272518)	千葉大学・大学院理学研究院・教授 (12501)	削除：2019年3月29日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計3件

国際研究集会 2nd Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range	開催年 2019年～2019年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関